

Inhoud:	
Postvulkanisme in Yellowstone	89
Tin-wolframafzettingen	96
Determineren met boraxparels	105
Zelfbouw-stenenbreker voor micromounters	108
	Veiligheid is levensbelang
	111
	Vissen zijn nog steeds te vinden
	114
	Boekbesprekingen
	115
	Bijlagen:
	Mededelingen, cursusprogramma 1979/1980, Kring- mededelingen. Uitnodiging voor "Open dag".

Postvulkanisme in Yellowstone: over fumarolen, hete bronnen en geysers

door E.G. van Diggelen

Een van de mooiste gebieden van het Noordamerikaanse continent is ongetwijfeld het Yellowstone Nationaal Park. Hier voelt de mens zich nietig tussen al die stromende warmwaterbronnen, spuitende geysers en borrelende modderpoelen. Een wonderschone kleurenpracht siert er de zonovergoten travertinterrassen. De indruk is overweldigend, vooral omdat men zich tussen al deze natuurverschijnselen kan begeven om de kwalijke geuren te ruiken en de warmte van de bronnen te voelen. Plotseling kan een schijnbaar levenloze bult van wit gesteente tot leven komen door een meters hoge straal kokend water en stoom uit de onbekende diepte in de lucht te spuiten. Ook vindt men nergens op aarde zoveel hete bronnen op zo'n kleine oppervlakte bij elkaar. Het Yellowstone Park - terecht het eerste Nationaal Park van de Verenigde Staten - is werkelijk een uniek stuk natuurschoon.

Pas in het jaar 1807 werd dit gebied van bergen en meren, rivieren met watervallen, hete bronnen en geysers voor het eerst door een blanke gezien. Deze was George Catlin, die zijn ganse leven eraan wijdde om met pen en tekenstift de Indiaanse zeden en gewoonten af te beelden. Het duurde echter tot 1870 voordat er een expeditie naar deze streek werd gehouden. Deze stond onder leiding van het hoofd van de topografische dienst van de nieuwe staat Montana, H.D. Washburn. De schoonheid van de natuur en het eigen karakter van dit gebied bleken zoveel indruk op de expeditieleiden te hebben gemaakt, dat twee jaar later - op 1 maart 1872 - deze streek tot een nationaal reservaat werd verklaard. Het kreeg de naam Yellowstone Nationaal Park, wat letterlijk geelsteen-park betekent. Dit was een vertaling van het "roche jaune" of "pierre jaune", wat sloeg op de geelgekleurde wanden van de canyon waarnaar Franse pelsjagers de streek hadden gedoopt.

In dit artikel zal wat dieper worden ingegaan op postvulkanische fenomenen. Hiertoe rekent men al die verschijnselen, welke nog lange tijd na een vulkaanuitbarsting kunnen optreden. Het zijn dus de vulkanische naverkingen, processen die het gevolg zijn van het feit dat een vulkanisch gebied nog niet helemaal is afgekoeld. Het Yellowstone Nationaal Park is zo'n gebied. We treffen hier ook de meest vermaarde geysers op aarde aan: de Old Faithful.

Het vulkanisme

Het vulkanisme behoort zeker tot de indrukwekkendste geologische processen op aarde. Misschien komt dat door zijn allesvernietigende werking, waarbij de mens machteloos moet toezien. Vulkanisme is in de loop van de aardgeschiedenis steeds op verschillende plaatsen op aarde actief geweest. Ook in het Yellowstone Nationaal Park. Zo waren er in het vroege Eoceen, ongeveer 50 miljoen jaar geleden, enkele grote vulkanen in dit gebied aanwezig. Maar het vulkanisme dat daar verantwoordelijk is voor de huidige postvulkanische verschijnselen blijkt van recentere datum te zijn. Ongeveer 600.000 jaar geleden - in het Kwartair - had zich diep in de ondergrond van dit gebied een enorm reservoir van gesmolten gesteente gevormd. Door de toenemende druk tegen het plafond boven deze magmakamer scheurde uiteindelijk dit dak en kon het magma op verschillende plaatsen over het aardoppervlak uitvloeien. Al snel werden steeds grotere hoeveelheden vulkanische producten uit de magmakamer geperst terwijl ook vulkanische as werd uitgeblazen. Door het verdwijnen van deze producten uit de ondergrond stortte uiteindelijk

het plafond boven de magmakamer in. Enorme brokken gesteente zakten in de lege kamer omlaag. Dit instorten moet ongetwijfeld met een oorverdovende klap hebben plaatsgevonden. Er vormde zich op deze wijze een enorme caldera in het centrale deel van het park (figuur 1). De vloer van deze Yellowstone caldera werd al spoedig bedekt door opnieuw uitgevloeiende lava, die als magma via spleten in de ringvormige breukzone omhoog kwam. Dit magma, dat een granitische samenstelling had koelde aan het aardoppervlak zo snel af, dat er een fijnkorrelige tot glasachtige equivalent van graniet ontstond, namelijk rhyoliet. De laatste lava vloeiende 60.000 - 75.000 jaar geleden over het aardoppervlak uit.

Thans bedekken zeker dertig verschillende lavauitvloeiingen dit gebied, dat men als het Rhyoliet Plateau aanduidt.

Nadat de vulkanische uitvloeiingen waren opgehouden werd het gebied een actieve plaats van vulkanische nawerkingen. Gasbronnen, heetwaterbronnen en geysers bleven tot op de dag van vandaag actief als de levende getuigen van een vulkanisch verleden. Of het Yellowstone Nationaal Park ooit nog eens een vulkanische uitbarsting zal beleven kan echter niemand met zekerheid zeggen.

De vulkanische nawerkingen

Niet alleen in het Yellowstone Nationaal Park treffen we postvulkanische verschijnselen aan, maar ook in andere gebieden op aarde. Zoals op IJsland, in Nieuw-Zeeland en Japan, op Java en in Kamchatka (Siberië). De hoeveelheid hete bronnen en geysers is echter nergens zo groot als in het Yellowstone gebied. Er zijn hier meer dan 3500 hete bronnen en zo'n 200 geysers, terwijl dat er bijvoorbeeld op IJsland veel minder zijn (circa 3000 hete bronnen en maar zo'n 30 geysers).

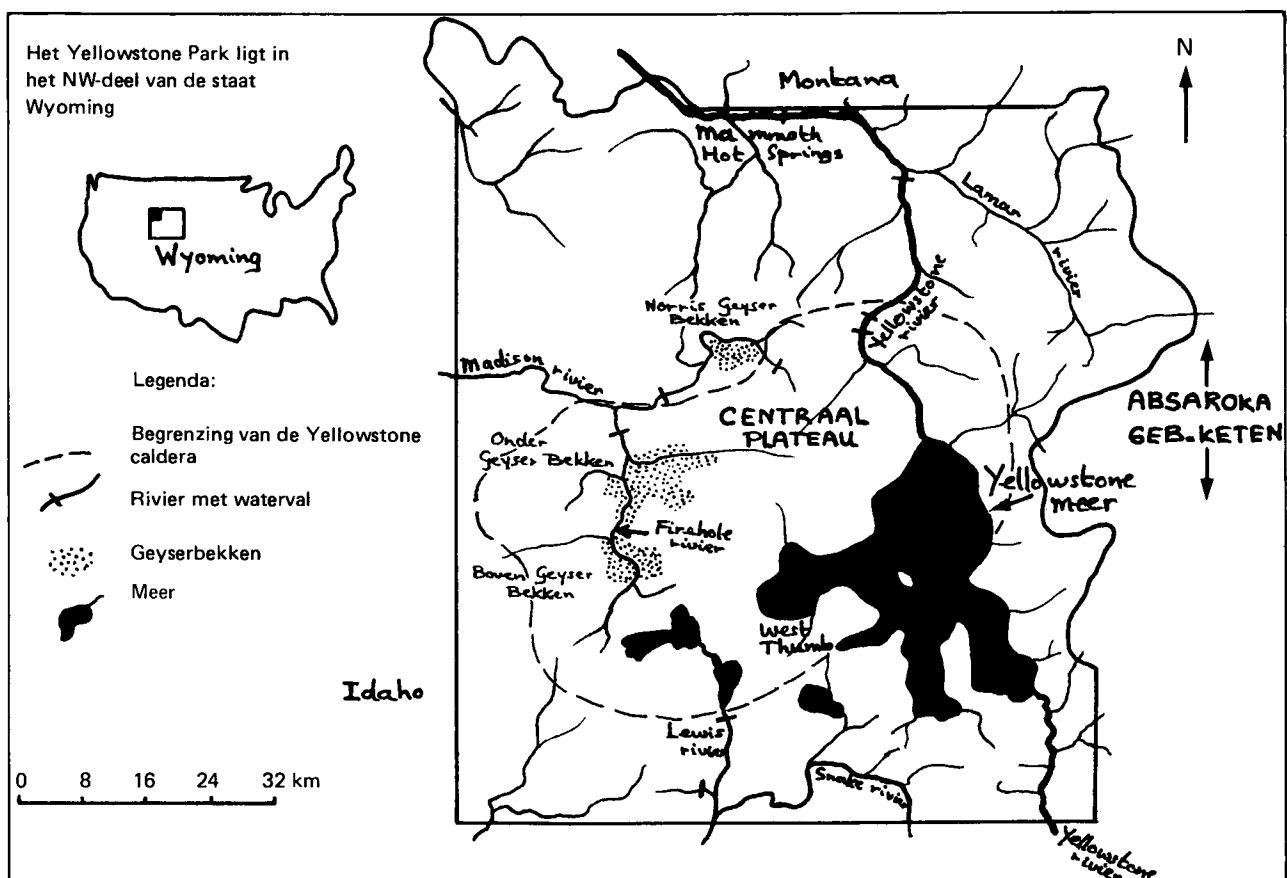
In het Yellowstone Nationaal Park liggen drie bekken, waar de grootste concentraties gasbronnen, heetwaterbronnen en geysers voorkomen. Het zijn het Beneden Geyser Bekken, het Boven Geyser Bekken en het Norris Geyser Bekken (figuur 1).

Het Boven en Beneden Geyser Bekken worden doorsneden door de Firehole-rivier. In het Boven Geyser Bekken vinden we de grootste concentratie van geysers, waaronder de beroemde Old Faithful. Andere bekende geysers zijn de Giant, de Giantess, de Grand en de Castle. De laatste heeft de grootste kegel opgebouwd en is waarschijnlijk de oudste geysers van het park. Van de vele hete bronnen in dit bekken kunnen de Morning Glory Pool en de Beauty Pool genoemd worden. In het Beneden Geyser Bekken spuiten meer dan twintig geysers en stromen zo'n 700 warme bronnen. Ook vindt men hier prachtig gekleurde modderpoelen, waarvan de taai, viskeuze brei voortdurend kookt. Sommige zijn zo groot dat men zelfs spreekt over reuzenmodderpoelen.

Dat vulkanische nawerkingen nog na meer dan 60.000 jaar plaatsvinden, is te danken aan het feit dat een magmalichaam ontzettend langzaam afkoelt.

Deze magma-haard ligt thans op sommige plaatsen van het Yellowstone Nationaal Park niet meer dan 3300 meter onder het aardoppervlak. De warmte die bij het langzaam afkoelende magma vrijkomt wordt aan het vaste gesteente rond de haard afgegeven. Zo geeft het Boven Geysers Bekken wel 800 maal meer warmte af dan normale, niet-thermale gebieden van dezelfde grootte zouden doen. Deze warmte is de motor van de thermale activiteit aan de oppervlakte. Maar alleen warmte is nog niet genoeg om

Figuur 1. Locatie en kaartje van het gebied van het Yellowstone Nationaal Park in de Verenigde Staten.



fumarolen (gasbronnen) te doen dampen, hete bronnen te doen koken en geysers te laten spuiten. Naast warmte is water onmisbaar bij de thermale activiteit. Uit onderzoeken bleek dat maar een uiterst gering percentage water als waterdamp door de afkoelende magmahaard wordt afgegeven. De waterdamp stijgt met andere vulkanische gassen via breuken en spleten naar boven en komt dan - volgens de jongste opvattingen - in een zone diep onder de oppervlakte terecht, waar grondwater in een circulatiesysteem is opgenomen. Hier vermengen de gassen zich met het al hete - vaak oververhitte - grondwater. Het mengsel stijgt dan op en treedt als gasbron, heetwaterbron of geysers aan de oppervlakte uit. Indien de weg naar boven gemakkelijk is - bijvoorbeeld een wijde, rechte buis door het gesteente - dan vormt zich aan de oppervlakte een gasbron (bij uittreding van gassen) of een kalm stromende heetwaterbron, die soms zo heet kan zijn dat de vloeistof hevig kookt. Wanneer echter een doolhof van scheuren en spleten in de grond verborgen is, gaat het uittreden moeilijker. Door de vele vernauwingen in zo'n ondergronds buizenstelsel zal de vloeistof niet voortdurend kunnen doorstromen. Zo nu en dan wordt heet water en stoom uit de ondergrond gespoten. Een dergelijke bron noemt men een geysers. Dat het uit de atmosfeer in de bodem geïnfilterd water - het zogenaamde meteorisch water - de belangrijkste leverancier is van het bronwater, blijkt wel uit het feit dat veel bronnen na een regenbui een versterkte activiteit vertonen.

Gasbronnen of fumarolen

Plaatsen aan het aardoppervlak waar gasuitstromingen plaatsvinden, duidt met aan als **gasbronnen** of **fumarolen** (van het Latijnse fumus = rook, damp). De meeste gasbronnen in het Yellowstone Nationaal Park bevatten gassen met een zeer hoog percentage waterdamp of stoom, zodat men wel spreekt over waterdampbronnen. De stoom ontsnapt soms met een sissend geluid uit de grond. Fumarolen die naast waterdamp veel zwaveldampen (zwavelverbindingen van vulkanische oorsprong) bevatten, duidt men wel aan als **solfatoren**, van het Latijnse sulphur (= zwavel). Dergelijke zwaveldampbronnen zijn al van verre te ruiken door hun rotte-eierengeur. Een bekende zwaveldampbron in het Yellowstone is bijvoorbeeld de Dragon's Mouth (Drakenbek). In het zuiden van Italië wordt de afgezette -gesublimeerde- zwavel zelfs geëxploiteerd. Naast zwaveldampbronnen zijn er ook fumarolen die een hoog percentage koolzuurgas (CO₂) uitstoten. Dergelijke gasbronnen noemt men **mofetten**. De temperatuur van mofetten ligt steeds beneden het kookpunt van water. Het uittredende koolzuurgas blijft altijd dicht bij de grond. Dit komt omdat koolzuurgas een hoger soortelijk gewicht heeft en dus zwaarder is dan lucht. Dicht bij de grond wordt de lucht uit depressies en kleine dalen verdrongen en maakt plaats voor het koolzuurgas. Zulke koolzuurgaspoelen zijn zuurstofarm en dodelijk voor de dieren. Men heeft in het Absaroka-gebergte wel eens een aantal dode grizzlyberen gevonden, die door zuurstofgebrek waren verstikt. Ook in het zuiden van Italië, bij Napels, vindt men een beroemde koolzuurgasbron: de Hondsgrot.

Hete bronnen

Bij de hete of warme bronnen ("hot springs") - ook wel thermen genoemd - is het verbindingskanaal tussen de opening van de bron en de diepte relatief eenvoudig, zodat het warme water voortdurend kan opborrelen. Er zijn zowel volkomen heldere, grote en diepe bronnen met prach-



Foto 1. Dampende heetwaterbronnen in het West Thumb-bekken aan het Yellowstone-meer.

tig blauw water als kleine, troebele bronnen die vaak een kwalijke geur verspreiden. Afhankelijk van de temperatuur van het water vindt men verschillende soorten blauwgroene algen die de hete bronnen de schitterendste kleuren geven.

Evenals bij de waterdampbronnen wordt ook bij de hete bronnen het bronwater voornamelijk geleverd door geïnfilterd meteorisch water. Als circulerend grondwater komt het in contact met het hete gesteente in de diepte en wordt daardoor opgewarmd. De temperatuur van het hete bronwater moet boven de 20°C liggen, maar het water wordt nooit in zijn geheel oververhit. Soms kan de vloeistof hevig koken, waarbij zo'n bron lijkt op een waterdampbron. Een dergelijke dampende bron is echter geen gasbron, omdat er geen gas maar heet water uit de ondergrond wordt aangevoerd. Dergelijke heetwaterbronnen geven het landschap een dampend aanzien (foto 1).

Opgemerkt moet worden dat heetwaterbronnen niet alleen in vulkanische gebieden voorkomen. Men treft ze ook elders aan, daar waar het door neerslag gevoede grondwater diep door de aardkorst circuleert. Hierbij wordt het water verwarmd. Het is immers een bekend feit dat als men dieper in de aardkorst afdaalt, de temperatuur toeneemt. Zo bedraagt de temperatuurtoename in West-Europa circa 30°C per 1000 meter diepte. Deze temperatuurtoename in de aardkorst is het gevolg van het uiteenvallen van radioactieve elementen, waarbij warmte vrijkomt.

Veel warmwaterbronnen zijn tevens minerale bronnen. Dit komt omdat warm water gemakkelijker mineralen oplost dan koud water. Bij zijn weg door de aardkorst komt het opgewarmde grondwater in langdurig contact met diverse gesteentetypen. Hierbij worden allerlei mineralen opgelost en met het grondwater meegevoerd. Indien het warme bronwater een zeer grote hoeveelheid minerale bestanddelen (zouten of gassen) in oplossing bevat, spreekt men over een minerale bron. Veel minerale bronnen in Europa zijn thans beroemde badplaatsen, die bezocht worden om de geneeskrachtige werking van het bronwater.

Elke heetwaterbron is uniek en bezit een eigen temperatuur en een eigen samenstelling van het water. Op grond van de zuurgraad van het water onderscheidt men zure, neutrale en basische (alkalische) heetwaterbronnen. In het Yellowstone Nationaal Park zijn de kleinere en hetere bronnen zuur (sulfaatbronnen), terwijl de grotere en minder hete bronnen basisch zijn en veel chloriden en carbonaten bevatten.

De meeste zure bronnen van het Yellowstone Nationaal Park vindt men in het Norris Geyser Bekken. In het Boven en Beneden Geyser Bekken vinden we in hoofdzaak neutrale tot zwak-alkalische (niet-zure) bronnen.

Algengroei en kleuren

Wat de hete bronnen van het Yellowstone-gebied tot een onvergetelijk schouwspel maakt zijn de prachtige kleuren. Bijna iedere warmwaterbron wordt gesierd door een wonderschone kleurenvariatie, die uiteenloopt van wit in de bron tot geel-groen, oranje en rood daarbuiten. Vroeger schreef men deze kleuren toe aan ijzerverbindingen die uit het traag stromende hete water werden neergeslagen. Slechts in enkele gevallen blijkt dat te kloppen. De meeste heetwaterbronnen hebben hun kleurenpracht echter te danken aan micro-organismen (enkele bacteriën, maar vooral algen). Dat deze microscopisch kleine wezens -die in enorme hoeveelheden dicht bij elkaar groeien- in het hete water kunnen leven hebben ze mogelijk te danken aan de enorm lange tijdspanne, waarin ze zich hebben kunnen aanpassen aan de extreme omstandigheden. Fossielen van blauw-groene algen werden al aangetroffen in gesteenten die meer dan 1 miljard jaar oud zijn.

De temperatuur en de zuurgraad van het water zijn de twee factoren die bepalend zijn voor de soort en de hoeveelheid micro-organismen. In de neutrale tot zwak-alkalische bronnen kunnen we het volgende kleurenpatroon tegenkomen. In het centrale deel van de bron, waar het water vaak kookt, ontbreken de blauw-groene algen en is de opening wit van kleur. Als het hete bronwater uit de poel stroomt en over de rand via een bepaalde stroombaan afvloeit, zal het geleidelijk afkoelen. Hoe verder we dus van de bron afgaan, des te koeler wordt het warme water. We constateren dat er steeds donkerder kleuren verschijnen in de richting van de temperatuurafname. Dit komt omdat er andere soorten blauw-groene algen verschijnen. Zo gauw de temperatuur tot 73 - 75°C is gedaald, is de bovenste temperatuurslimiet bereikt waarbij blauw-groene algen kunnen leven. De overgang van het witte brongebied naar het geel-groene is dan ook scherp. Bij nog lagere temperaturen verschijnen oranje en donker-groene kleuren in het thermale landschap. De kleur wordt veroorzaakt door kleurstoffen binnen de cellen. Alle algen bezitten het groene chlorofyl, dat de

Foto 2. Wanneer kokend heet geyserswater wordt uitgespoten koelt het af en slaat kiezelsinter eruit neer. Rond het spuitgat vormt zich een kegel, zoals hier die van de Old Faithful-geyser.



organismen in staat stelt energie uit zonlicht te verkrijgen. Samen met een andere kleurstof die sommige algen bezitten, geeft dit deze algen een blauw-groene kleur. Omdat al deze blauw-groene algen ook gele, oranje of rode kleurstoffen bezitten, kan bij een geringe hoeveelheid chlorofyl de groene of blauw-groene kleur totaal overschaduwd worden door de gele, oranje of rode kleuren. Wat de zure heetwaterbronnen betreft - die voornamelijk worden aangetroffen in het Norris Geyser Bekken - kan men stellen dat er andere soorten micro-organismen worden gevonden, die bij veel minder hoge temperaturen groeien. Hun hoeveelheid is ook veel geringer dan bij de neutrale en zwak-alkalische bronnen. Boven een temperatuur van 56°C treffen we er geen algenleven meer in aan.

Bronafzettingen

Vele heetwaterbronnen van het Rhyoliet Plateau bevatten aanzienlijke hoeveelheden opgelost kiezelzuur (SiO_2). Ook de meeste geysers spuiten stoom en kiezelzuurhoudend water uit hun spuitgat. Rond deze opening wordt dan een kegel van kiezelsinter of geysieriet ($\text{SiO}_2 \cdot n \text{H}_2\text{O}$) opgebouwd. Ook de kegel van de Old Faithful bestaat uit een ophoping van het mineraal geysieriet (foto 2).

Het wit-grijze geysieriet beslaat in de geyserbekken grote oppervlakten (foto 3). De dode wit-grijze boomstammen in die bekkens geven het landschap een spookachtig aanzien. Door een verandering in de thermale activiteiten werden deze bomen door heet water overspoeld en gingen dood. Doordat de boomstammen water en mineralen -in dit geval geysieriet- uit de bodem opnamen, bleef na de verdamping van het water de geysieriet achter. De boomstammen zijn daardoor nog bewaard gebleven in het geyserbekken (foto 1 en 3). Ook in het Yellowstone-meer kan zich een hete bron vormen, die in het koele meerwater een korst van geysieriet rond zijn opening opbouwt (foto 4). Soms vormt zich een kegel (foto 5). In het noordwestelijk deel van het park stroomt het grondwater diep in de grond door een kalksteenformatie. Het opgewarmde grondwater lost hier de kalk op, waarbij calciumbicarbonaat ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$)-houdend water naar de oppervlakte wordt getransporteerd. Waar dit water uitstroomt vindt neerslag en kristallisatie plaats van calciumcarbonaat (CaCO_3) onder ontwijken van koolzuurgas (CO_2). Een dergelijke bronafzetting van CaCO_3 noemt men kalksinter of travertijn.

Foto 3. Grijswitte kiezelsinter-afzettingen bedekken het bekken van West Thumb. De dode boomstammen wijzen op een plotseling optreden van hydrothermale activiteit in dit gebied.





Foto 4. Waar een hete bron aan de oppervlakte uittreedt vormt zich rond die opening een afzettingskorst van kiezelsinter (West Thumb aan het Yellowstone-meer).



Foto 5. Een kegel van kiezelsinter, opgebouwd in het Yellowstone-meer, West Thumb.

Dit grauwwitte poreuze gesteente duidt men ook wel eens aan als kalktuf, wat echter minder juist is. Het begrip tuf wijst immers op een pyroklastische afzetting, terwijl het hier gaat om een chemisch afzettingsgesteente. Een dergelijke CaCO_3 -afzetting in grotten noemt men druipsteen. Travertijnafzettingen kunnen terrassen vormen, die prachtig getrap zijn. Bijvoorbeeld die van Mammoth Hot Springs in het noordwesten van het Yellowstone Park (foto 6). De travertijnterrassen zijn hier ongeveer 30 meter hoog en hebben verschillende namen gekregen, zoals het Minerva-terras en het Jupiter-terras. De bouw van travertijnterrassen doet denken aan een aantal opeenvolgende treden van een trap. Elke trede bestaat uit een grote sikkelvormige kom of depressie waarin bronwater staat. Deze boven elkaar gelegen kommen worden van elkaar gescheiden door richels of overhangende wanden, waarlangs het water omlaag sijpelt (figuur 2). De vormgeving is mede te danken aan in het water levende kalkwieren of kalkalgen, die voor hun koolzuurassimilatie het koolzuur aan het bronwater onttrekken. Daardoor wordt de kalksinter sneller neergeslagen. Daarnaast sieren de algen de travertijnterrassen met hun wonderschone kleuren.

Sommige rood-bruine en diep-zwarte tinten zijn veroorzaakt door de neerslag van ijzerhoudende verbindingen uit het water. Ook in modderbronnen ("mudpots") zijn ze afgezet. Bij dergelijke modderbronnen is de aanvoer van heet water gering, zodat de kleimineralen niet worden uitgestoten maar in de bron blijven. De kleimineralen ontstaan bij de silicaatverwerking. Het hete bronwater verweert de rhyoliet -die rijk aan silicaten is- waarbij metaalionen (o.a. ijzer) vrijkomen. Het zijn de ijzerverbindingen die de modderpoelen -gevormd uit fijne, visceuze klei- hun rode kleur geven. Men duidt dergelijke modderbronnen aan als "paintpots" (verfpotten). De crèmekleurige, grijze, gele, bruine, rode of groenachtige verfpotten borrelen voortdurend. Daarbij stijgen uit de modderbrei gasbellen op, die aan de oppervlakte uiteen barsten.

Geysers

Een geysir - ook wel eens lyrisch heetwaterfontein genoemd - zou men het beste kunnen omschrijven als een speciaal type hete bron, waaruit op min of meer regelmatige tijden een straal kokend heet water en stoom spuit. Het woord is ontleend aan een eigenaam, namelijk de "stora Geysir", een van de vele spuitende bronnen op IJs-

land. Het IJslandse woord geysir betekent spuiters. Volgens sommige auteurs zou het woord geysir afkomstig zijn van het IJslandse werkwoord geysa, dat stromen betekent. De meeste geysers spuiten nog geen 5 minuten, slechts enkele wel meer dan een uur achtereen. De beroemde Old Faithful-geyser spuit 2 tot 5 minuten, waarbij een straal heet water en stoom 30 tot 55 meter hoog in de lucht wordt gespoten. Zo nu en dan wordt een eruptie van 60 meter hoog bereikt. In Nieuw-Zeeland werd in 1901 zelfs een hoogte waargenomen van ruim 450 meter. De waterzuilen bezitten vaak de vorm van een waaier, soms is er sprake van een mooie slanke waterstraal, (foto 7). Rond hun spuitgat bouwen ze prachtige kegels op van het mineraal geysieriet (foto 2 en 7).

De tijd tussen twee erupties is voor elke geysir weer anders. Bij sommige geysers is dat enkele minuten, bij andere vele dagen. Voor veel geysers is het elke keer weer een verrassing wanneer ze gaan spuiten. Slechts enkele geysers houden zich aan min of meer regelmatige tijden. Hiertoe behoort bijvoorbeeld de Old Faithful.

Wat de herkomst van het geysierwater betreft kan men stellen, dat evenals bij het hete bronwater minstens 85% afkomstig is uit de atmosfeer en slechts 15% uit de diepere ondergrond. Deze laatste 15% komt vrij bij uitkristalliseren van magma's in de aardkorst.

Bijna alle geysers behoren tot de basische bronnen. In een enkel geval is het hete water zuur.

In het water komt opgelost kiezelzuur voor, dat in de hete bron wordt afgezet. Het verbindingskanaal van een hete bron met de diepte wordt daardoor verhoogd, waarbij er veel vernauwingen ontstaan. Hierdoor zijn er ideale om-

Figuur 2. Dwarsdoorsnede door de travertijnterrassen van Mammoth Hot Springs. In elke kom staat bronwater, dat over de richels heensijpelt.

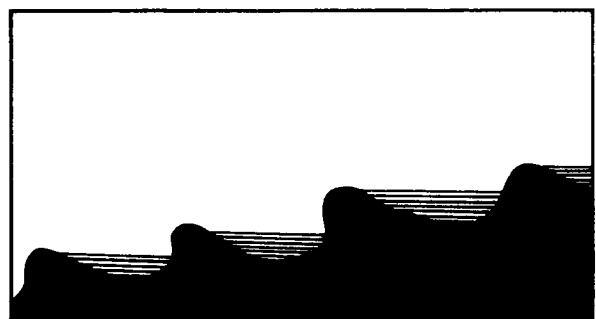




Foto 6. De travertinterrassen van Mammoth Hot Springs.

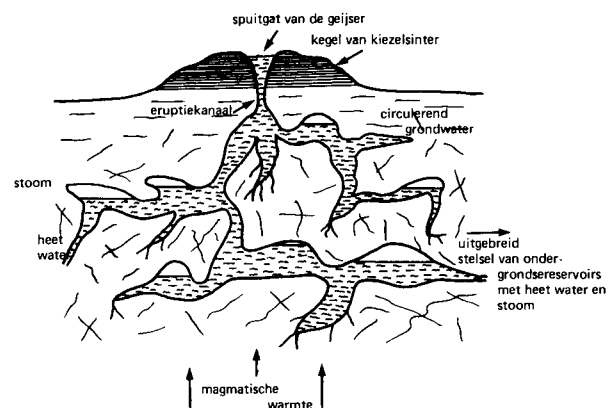


Foto 7. Deze geyser in het gebied van de Firehole Lake Drive spuit een mooie slanke waterstraal. Rond zijn opening heeft hij al een flinke sinterkegel opgebouwd.

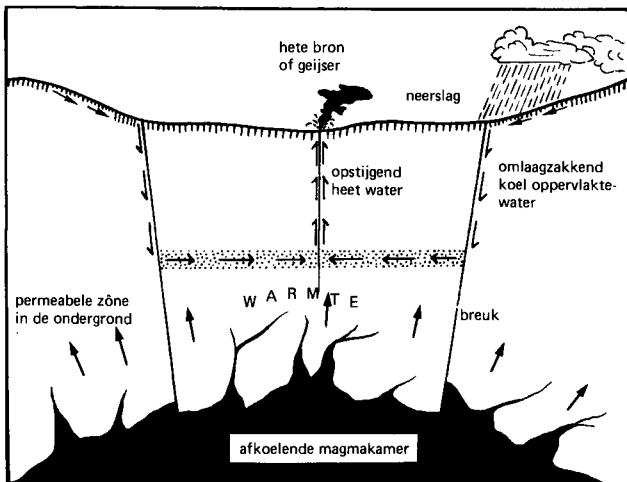
standigheden ontstaan voor geyservorming. Een geyser is dus in wezen een speciaal type hete bron, met een uitgebreid stelsel van ondergrondse reservoirs die op verschillende niveaus liggen (figuur 3). Het is dus het onderaardse gangenstelsel dat een geyser zijn eigen karakter geeft. Door de vele vernauwingen in de buizen kan het water niet constant doorstromen, maar wordt gehinderd. Over de wijze waarop een geyser werkt is een theorie opgesteld die bekend staat als de Bunsentheorie. Later heeft Th. Thorkelsson een deel van deze theorie gewijzigd, zodat men thans liever spreekt over de **gewijzigde Bunsentheorie**. Toen de Duitse chemicus R. Bunsen in 1846 de "Grote Spuiter" (Stora Geysir) op IJsland onderzocht, voerde hij het begrip "geysir"- later omgevormd tot geyser- als een technische term in de geologie in. Bunsen veronderstelde

dat het eruptiekanaal een buisvormige verbinding had met een ondergronds gangenstelsel (figuur 3). Het bijna verticale eruptiekanaal is gevuld met water, dat voornamelijk uit de atmosfeer afkomstig is. In het onderste deel van de buis wordt het water verwarmd door uit de diepte opstijgende vulkanische gassen. Op een bepaald moment zal de temperatuur van dit onderin de buis voorkomende water tot aan het kookpunt -zoals dat aan de oppervlakte geldt- stijgen. Dat is in het Yellowstone Park, op zo'n hoogte van 2500 meter boven zeeniveau, geen 100°C , maar 92°C ten gevolge van de geringere luchtdruk. Door het gewicht van de in de buis staande kolom water zal het water onderin de buis zelfs bij 150°C nog niet koken. Volgens Th. Thorkelsson is dat ook niet nodig, omdat in dit oververhitte water (= water met een temperatuur boven de 100°C dat echter nog niet kookt) veel opgeloste gassen voorkomen, die van magmatische oorsprong zijn. Op een gegeven moment vormen zich kleine gasballetjes onderin het buizenstelsel. Deze stijgen omhoog en zullen als gevolg van de drukafname in grootte toenemen. Tevens nemen ze bij het expanderen (uitzetten) veel waterdamp op, terwijl hun aantal snel groeit. Ze worden steeds groter en duwen het water boven in de kolom voor zich uit, waardoor er aan de oppervlakte - uit de opening van de geyser - heet water wordt uitgestoten. Doordat er water uit de kolom verdwijnt wordt deze minder zwaar en treedt er dus drukontlasting op. Daardoor kan het oververhitte water onderin de buis eindelijk wel gaan koken, zodat er zich nog grotere hoeveelheden opstijgende gasbellen vormen die veel waterdamp opnemen en dus in diameter toenemen. Het volume van deze met waterdamp verzadigde gasbellen kan bij dit expanderen wel een paar honderd maal groter worden. Deze stoom stoot aan de oppervlakte daardoor nog meer heet water uit, waardoor de druk nog verder afneemt. Uiteindelijk resulteert deze kettingreactie in een eruptie, waarbij al het hete water bovenin de buis door de stoom eronder omhoog wordt geduwd. In een tientallen meters hoge zuil wordt een mengsel van heet water en stoom in de lucht gespoten. Na de eruptie vult het eruptiekanaal zich opnieuw met koel bodemwater, dat toestroomt uit het systeem van ondergrondse zijkanalen. De cyclus zal zich weer herhalen, waarbij de tijd tot de volgende eruptie afhankelijk is van de snelheid waarmee het water in het stelsel toestroomt en het lagere deel van het stelsel opnieuw wordt verhit.

In de hierboven uiteengezette theorie werd de opwarming van het geysierwater toegeschreven aan hete magmatische gassen die uit de diepte afkomstig zijn. De verhit-



Figuur 3. Schematische doorsnede van de bron van een geyser.



Figuur 4. Een schematische voorstelling van een diepte-circulatiesysteem (naar o.a. Donald E. White).

ting van het geysersysteem vond dus dicht onder de oppervlakte plaats. Naar aanleiding van informatie, verkregen uit diepteboorings, werd aan het einde van de zestiger jaren een theorie opgesteld die bekend staat als de "diepte-circulatie theorie". Deze theorie, die o.a. door Donald E. White werd geponeerd stelt dat het geysersysteem van hete bronwater opgenomen is in een convectioneel circulatiesysteem dat tot op grote diepte reikt (figuur 4). De circulatie van het water kan tot wel meer dan 3 kilometer diepte plaatsvinden. Het zijn dus niet de opstijgende vulkanische gassen die het water verhitten, maar het is het contact met zeer heet stollingsgesteente dat in de diepte het water verwarmt. Via steile breuken, die bij de ringvormige caldera zijn ontstaan, zakt het oppervlakte-water naar beneden. Daar wordt het water verhit tot temperaturen die aan het oppervlak ver boven het kookpunt zouden liggen. Maar als gevolg van de hoge druk zal het water op die diepte niet koken. In de geysersbekkens stijgt dan het oververhitte water via spleten omhoog, omdat het door de hogere temperatuur uitzet en daardoor lichter van gewicht wordt (water bij 250°C is 20% lichter dan water bij 4°C!). Het koele, zwaardere water stroomt daarbij in de diepte van de zijkanten toe en drukt het oververhitte water naar boven. Omdat naar de oppervlakte toe de druk afneemt zal het oververhitte water door deze drukontlasting hevig gaan koken. Indien de uitstroming naar de oppervlakte gemakkelijk kan plaatsvinden ontstaat er een hete bron. Wanneer er echter een lokaal buizenstelsel met vernauwingen aanwezig is, zal het aan de oppervlakte tot een eruptie komen. Op deze wijze is de kringloop van het water in het gigantische onderaardse circulatiesysteem volbracht. Terwijl stoom en water aan de atmosfeer worden afgegeven, zullen regen en sneeuw het systeem weer van water voorzien.

De Old Faithful

Een van de beroemdste geysers op aarde is wel de Old Faithful (Oude Getrouwe) (foto 8). Door zijn opvallende getrouwheid vormt hij het symbool van het Yellowstone Nationaal Park. Hij spuit gemiddeld 22 keer per dag, waarbij er elke keer zo'n 14.000 tot 25.000 liter water in de lucht wordt gespoten. Deze geyserspuiter dag en nacht, winter en zomer, jaar na jaar, zonder onderbreking sedert hij in 1870 door de leden van de Washburn-expeditie werd beschreven. Dat de Old Faithful zo bekend is komt dus door zijn frequente erupties. Toch spuit hij niet op regel-

matige tijden. Men kan het niet op de minuut af zeggen, zoals sommige mensen wel eens vertellen of schrijven. Deze foutieve veronderstelling is te wijten aan een veel te korte en daardoor verkeerde waarneming van de Washburn-expeditie. De leden hiervan hadden de geysers maar 2 dagen geobserveerd en trokken daaruit de conclusie dat de geysers elk uur zijn straal heet water en stoom uitspoot. Wat men alleen kan zeggen is dat de Old Faithful betrouwbaar is in het feit dat hij iedere 24 uur 21 tot 23 maal een eruptie heeft. Maar volgens zijn eigen patroon, dat een tijdsinterval tussen de erupties te zien geeft van slechts 33 minuten tot maximaal 148 minuten. Zo nu en dan is er een eruptie om het uur.



Foto 8. De wereldberoemde Old Faithful-geyser. Let op de waaivormige zuil van water en stoom.

Geraadpleegde literatuur

- Alt, David D. en Hyndman, Donald W., 1978, Roadside Geology of the Northern Rockies, Mountain Press Publ. Company, 280 blz.
- Brock, Thomas D. en Louise M., 1971, Life in the geysers basins, Yellowstone Library and Museum Assoc., 32 blz.
- Bullard, Fred M., 1963, Volcanoes in history, in theory, in eruption, University of Texas Press, 441 blz.
- Crandall, Hugh, 1977, Yellowstone, the story behind the scenery, KC Publications, 48 blz.
- Harris, Ann G., 1977, Geology of National Parks, Kendall/Hunt Publ. Company, 396 blz.
- Keefer, William R., 1976, The geologic story of Yellowstone National Park, Geol. Survey Bulletin 1347, Yellowstone Library and Museum Assoc., 92 blz.
- MacDonald, Gordon A., 1972, Volcanoes, Prentice-Hall Inc., New Jersey, 510 blz.
- Marler, George D., 1974, The story of Old Faithful, Yellowstone Library and Museum Assoc., 49 blz.
- Walker, Bryce S., 1974, De Rocky Mountains, in: De Wereld der Woeste Natuur, Time-Life boeken, A'dam, 184 blz.